

ESTIMACIÓN DE ESTADO EN REDES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE: APLICACIÓN PARA EL ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE LA DETECTABILIDAD DE FUGAS

Sarai Díaz¹, Javier González² y Roberto Mínguez³

¹ Departamento de Ingeniería Civil y de la Edificación, Universidad de Castilla-La Mancha, España.

² Departamento de Ingeniería Civil y de la Edificación, Universidad de Castilla-La Mancha, España.

³ HIDRALAB Ingeniería y Desarrollos, Spin-off Universidad de Castilla-La Mancha, España.

E-mail: Sarai.Diaz@uclm.es, Javier.Gonzalez@uclm.es, roberto.minguez@hidralab.com

Resumen

Las técnicas de estimación de estado son las técnicas más apropiadas para monitorizar en tiempo real los sistemas de abastecimiento de agua potable. Las mismas permiten inferir el estado hidráulico de una red en su conjunto, a partir de la información proveniente de un sistema de sensores. Estas técnicas pueden ser utilizadas para la identificación de fugas, y para ello es importante cuantificar la capacidad de un sistema de sensores para su detección. En este trabajo, se presenta una nueva aplicación de estas técnicas que permite analizar probabilísticamente la capacidad de detectar fugas en una red (i.e. detectabilidad de fugas) a partir de la información proporcionada por los sensores disponibles.

Introducción

En los últimos años se ha producido un notable aumento en el número de equipos de medida instalados en las redes de distribución de agua potable. Además, esta mejora en la instrumentación ha venido acompañada de la implementación de sistemas SCADA (del inglés, *Supervisory Control and Data Acquisition*), especialmente en grandes ciudades. Este tipo de plataformas recogen remotamente los datos registrados por los diferentes sensores distribuidos por la red, pero esta información no supone una mejora inmediata para la operación del sistema. Para ello, es necesario procesar previamente las señales de telemetría recibidas, de modo que se pueda inferir a partir de los datos aislados y sujetos a la incertidumbre propia de los aparatos de medida el estado hidráulico más probable del sistema. Sólo una vez caracterizadas las presiones, flujos y demandas en la red, es posible conocer el sistema y tomar decisiones que contribuyan a mejorar su gestión.

Las técnicas de estimación de estado (EE) son una forma de procesar las lecturas de los aparatos de medida. La EE se viene implementando con éxito en redes de suministro de energía eléctrica desde hace décadas (Schweppe and Wildes, 1970; Caro et al., 2009; Caro et al., 2013), pero su adaptación a los sistemas de distribución de agua potable ha sido más lenta. Las metodologías relacionadas con la EE han sido ampliamente discutidas a nivel científico en la industria del agua desde principios de los años 1980s (Sterling and Bargiela, 1984; Powell et al., 1988; Kumar et al., 2008), pero apenas han sido implementadas en redes de abastecimiento reales a nivel operacional (Carpentier and Cohen, 1991; Powell, 1992; Preis et al., 2011). Una de las principales causas de esta situación es que muchas aplicaciones específicas para los sistemas de suministro de agua, como por ejemplo la calibración, la detección de fugas o el análisis topológico de la red, no han sido abordadas desde la perspectiva de la EE (Díaz, 2017).

En este contexto, diferentes autores han comenzado a desarrollar en los últimos años investigaciones que permiten abordar el problema de la monitorización en tiempo real (y aplicaciones relacionadas) desde el punto de vista de la EE. Por ejemplo, Kumar et al. (2010) y Díaz et al. (2017) han afrontado el problema de la calibración del sistema (i.e. ajuste de los

parámetros del modelo) mediante técnicas de EE. Además, Díaz et al. (2018a) han propuesto expresiones explícitas para el análisis de sensibilidad de la estimación de estado, y Díaz et al. (2018b) han incluido el análisis topológico en el proceso de EE. El objeto de este trabajo es presentar una metodología para el análisis probabilístico de la capacidad de detección (i.e. detectabilidad) de fugas en redes de abastecimiento de agua potable instrumentadas y teled medidas. Esta propuesta supone por tanto una primera etapa en la adaptación de las técnicas de EE a la aplicación de la detección de fugas, y se presenta como una alternativa competitiva a otros métodos existentes (Mounce et al., 2010; Romano et al., 2014).

Metodología

Un estimador de estado es un algoritmo que permite calcular, a partir de los datos recogidos por el sistema de telemetría y las ecuaciones de gobierno del problema hidráulico, las condiciones de flujo en cualquier punto y posición en el sistema. La EE se plantea como un problema de mínimos cuadrados:

$$\min_x J(x, z) = \frac{1}{2} [z - h(x)]^T W [z - h(x)] \quad [1]$$

sujeto a:

$$f(x) = 0 \quad [2]$$

$$g(x) \leq 0, \quad [3]$$

siendo \hat{x} la solución óptima al problema [1]-[3]. La Ecuación [1] representa la función objetivo por la cual se minimiza la diferencia entre las variables de estado del sistema x (por ejemplo, los niveles piezométricos en los nodos de la red) y las medidas disponibles z (por ejemplo, medidas de nivel piezométrico, demanda o flujo), las cuales se relacionan entre sí mediante la relación no lineal definida por h . Por su parte, W representa la matriz de pesos, mientras que las restricciones [2] y [3] contienen las ecuaciones de gobierno del problema hidráulico (i.e. ecuación de balance y ecuación de pérdidas de energía) y otros límites conocidos de las variables, respectivamente.

El método aquí presentado para evaluar la capacidad de detección de fugas se basa en un análisis probabilístico de los residuos normalizados del problema [1]-[3], que se espera sean elevados cuando existen fugas en el sistema. Al fin y al cabo, la existencia de una fuga supone una demanda adicional en un nodo del sistema, por lo que vendrá asociada a notables diferencias entre medidas y estimaciones. Por tanto, sería posible utilizar un test de hipótesis en los residuos normalizados para evaluar si existen o no fugas en un determinado escenario hidráulico. Sin embargo, antes de aplicar este procedimiento en tiempo real, es necesario analizar hasta qué punto sería posible percibir que se está perdiendo agua en el sistema con los aparatos de medida disponibles. Por este motivo, en este trabajo se presenta un análisis probabilístico de la detectabilidad de

fugas en una red para un nivel de instrumentación dado. Más concretamente, la probabilidad de detectar fugas se calcula utilizando la distribución bivariada de las medidas y las estimaciones en un único escenario hidráulico. Esto evita el uso de simulaciones de Monte Carlo, las cuales requieren un excesivo tiempo de cálculo.

Resultados

En este trabajo se presenta como caso de estudio la red de Hanoi (Fujiwara and Khang, 1990), en la que se analiza la probabilidad de detección de fugas para un nivel de instrumentación y un escenario de demandas dados. El análisis probabilístico se realiza primero con la metodología presentada en este trabajo (utilizando la distribución bivariada de medidas-estimaciones), y después mediante simulaciones de Monte Carlo. Se obtiene que el tiempo de cálculo requerido por la nueva metodología es tres órdenes de magnitud inferior al tiempo de cálculo necesario para un test de 1000 simulaciones de Monte Carlo.

Además, el método presentado se puede utilizar para identificar la mínima fuga que se podría detectar en diferentes posiciones de la red con los aparatos de medida disponibles y para un escenario de demandas concreto. La Figura 1 muestra el mapa de detectabilidad relativa para el caso de estudio analizado. Este tipo de figura da una idea intuitiva de dónde deberían colocarse aparatos de medida adicionales para caracterizar mejor la pérdida de agua (i.e. roturas u otros flujos inusuales). Por tanto, constituye una herramienta útil que puede ser utilizada por los gestores para mejorar la eficacia de la red de abastecimiento de agua potable.

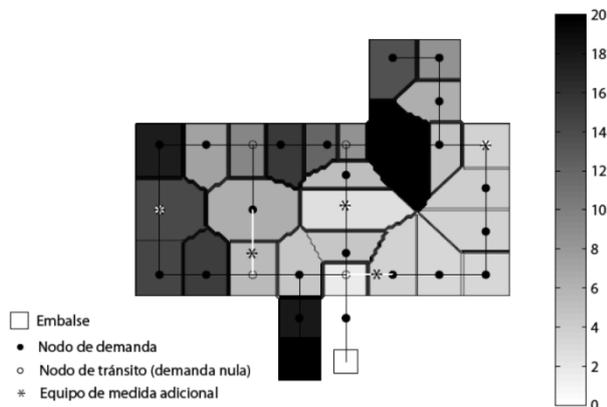


Figura 1.- Mapa de detectabilidad relativa (en %) para el caso de estudio considerado.

Referencias

- Caro, E., Conejo, A.J. and Mínguez, R. (2009). "Power system state estimation considering measurement dependencies". *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 24, No. 4, pp. 1875-1885.
- Caro, E., Mínguez, R. and Conejo, A.J. (2013). "Robust WLS estimator using reweighting techniques for electric energy systems". *Electric Power Systems Research*, Vol. 104, pp. 9-17.
- Carpentier, P. and Cohen, G. (1991). "State estimation and leak detection in water distribution networks". *Civil Engineering Systems*, Vol. 8, No. 4, pp. 247-257.
- Díaz, S. (2017). *Comprehensive approach for on-line monitoring water distribution systems via state estimation related techniques*. PhD thesis, University of Castilla-La Mancha, Spain.
- Díaz, S., Mínguez, R. and González, J. (2017). "Calibration via multi-period state estimation in water distribution systems". *Water Resources Management*, Vol. 31, No. 15, pp. 4801-4819.

Díaz, S., Mínguez, R., González, J. and Savic, D. (2018a). "Explicit expressions for state estimation sensitivity analysis in water systems". *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 144, No. 4, doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000914.

Díaz, S., Mínguez, R. and González, J. (2018b). "Topological state estimation in water distribution systems: A mixed integer quadratic programming approach". *Journal of Water Resources Planning and Management*, doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000934.

Fujiwara, O. and Khang, D.B. (1990). "A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks". *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 4, pp. 539-549.

Kumar, S.M., Narasimhan, S. and Bhallamudi, S.M. (2008). "State estimation in water distribution networks using graph-theoretic reduction strategy". *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 134, No. 5, pp. 395-403.

Kumar, S.M., Narasimhan, S. and Bhallamudi, S.M. (2010). "Parameter estimation in water distribution networks". *Water Resources Management*, Vol. 24, No. 6, pp. 1251-1272.

Mounce, S.R., Boxall, J.B. and Machell, J. (2010). "Development and verification of an online artificial intelligence system for detection of bursts and other abnormal flows". *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 136, No. 3, pp. 309-318.

Powell, R.S. (1992). *On-line monitoring for operational control of water distribution networks*. PhD thesis, University of Durham, United Kingdom.

Powell, R.S., Irving, M.R. and Sterling, M.J.H. (1988). "A comparison of three real-time state estimation methods for on-line monitoring of water distributions systems". *Computer Applications in Water Supply*, Vol. 1, pp. 333-348.

Preis, A., Whittle, A.J., Ostfeld, A. and Perelman, L. (2011). "Efficient hydraulic state estimation technique using reduced models of urban water networks". *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 137, No. 4, pp. 343-351.

Romano, M., Kapelan, Z. and Savic, D.A. (2014). "Automated detection of pipe bursts and other events in water distribution systems". *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 140, No. 4, pp. 457-467.

Schweppe, F.C. and Wildes, J. (1970). "Power system static-state estimation, Part I: Exact model". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-89, No. 1, pp. 120-125.

Sterling, M.J.H. and Bargiela, A. (1984). "Minimum norm state estimation for computer control of water distribution systems". *IEE Proceedings D - Control Theory and Applications*, Vol. 131, No. 2, pp. 57-63.